

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни
«Фізика твердого тіла»
для студентів спеціальності
153 «Мікро- та наносистемна техніка»
Частина 1

Затверджено
на засіданні кафедри фізичного
матеріалознавства для електроніки
та геліоенергетики,
протокол №7 від 30.01.2019 р.

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Фізика твердого тіла» для студентів спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка». Частина 1 / Уклад.: Р.В. Зайцев, М.В. Кіріченко, К.О. Мінакова, А.М. Дроздов. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – 51 с.

Укладачі: Р.В. Зайцев,
М.В. Кіріченко,
К.О. Мінакова,
А.М. Дроздов

Рецензент доц. І.В. Федорін

Кафедра фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики

ВСТУП

Методичні вказівки містять лабораторні роботи для студентів усіх спеціальностей.

Основна спрямованість методичних вказівок з предмету фізика твердого тіла – дати можливість студентам за допомогою досліду вивчити важливі фізичні явища. Опис лабораторних робіт не претендує на те, щоб створити у студентів повне уявлення про явища, які вивчаються. Таке уявлення може виникнути лише внаслідок опрацювання лекцій та підручників.

Велика увага в методичних вказівках з фізики твердого тіла для студентів технічних спеціальностей приділяється обробленню результатів вимірювання. Для успішного виконання робіт необхідна попередня самостійна підготовка, в першу чергу теоретична.

Кожна лабораторна робота розрахована на дві академічні години занять у лабораторії. Перед заняттям студент повинен підготувати протокол лабораторної роботи, вивчивши відповідний теоретичний матеріал.

Під час заняття студенти проводять необхідні виміри, виконують розрахунки, доводять звіт до висновку. Результати вимірювання обговорюються з викладачем і затверджуються.

Повністю оформлений звіт по лабораторній роботі потрібно подати викладачу до кінця заняття. Він повинен містити: титульний лист, номер лабораторної роботи та її назву, перелік приладів і обладнання, мету роботи, схему установки, розрахункові формули, таблицю результатів вимірів і розрахунки, висновки за результатами роботи. Графіки повинні бути виконані на міліметровому папері.

Якщо студент не встигає захистити лабораторну роботу до кінця заняття, дозволяється оформити звіт (графіки) з використанням комп'ютерних програм (Excel, Origin) до наступного заняття.

Лабораторна робота вважається виконаною після успішно проведеного захисту шляхом співбесіди студента з викладачем (захист звіту + оцінка за теоретичний матеріал).

Захист звіту: мета роботи + експериментальна методика + висновки.

Теоретичний матеріал: знання фізичних явищ, які вивчалися у даній лабораторній роботі (закони, формули).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

ЕЛЕМЕНТИ СТРУКТУРИ КРИСТАЛІЧНИХ ТІЛ

Мета роботи – ознайомитися з основними елементами симетрії кристалів.

1.1 Загальні відомості

Кристалічні тіла відрізняються від інших тіл тим, що атоми або молекули в них утворюють у просторі періодичну структуру. Ознакою кристалічного тіла є наявність температури плавлення (кристалізації), а також характерних площин на зломі. Періодична структура називається **кристалічною ґраткою або решіткою**. Геометричні параметри кристалічних ґраток вивчають за допомогою дифракції рентгенівських променів, або дифракції електронів. Ці параметри обумовлені властивостями атомів та природою взаємодії між ними. Дослідженнями кристалічних тіл було встановлено, що за геометричними параметрами різні кристалічні ґратки можна розділити **на сім груп (сингоній)**.

В кристалічній ґратці існує такий найменший паралелепіпед (рис. 1.1, б), який має всі характерні ознаки даної періодичної структури. Якщо цей паралелепіпед послідовно переміщувати вздовж трьох його ребер, які виходять із однієї вершини, то можна побудувати кристалічну ґратку всього кристалу. Цей паралелепіпед називають **елементарною коміркою кристалічної ґратки**.

На рис. 1.1, а показана кубічна кристалічна ґратка. Точками відображені центри атомів, які входять до даного кристалу. Кубик *ABCDOKLM* являє собою елементарну комірку цієї структури.

Відстані *OB*, *OK*, *OM* називають **сталими кристалічної ґратки**. Для кубічної ґратки вони однакові, тобто:

$$OB = OK = OM = a.$$

де *a* – стала кубічної ґратки.

В атомних структурах для лінійних розмірів використовують одиницю довжини – ангстрем. $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$. Очевидно, що *a* – це величина порядку діаметра атома, що дорівнює декільком ангстремам. Впевнемось у цьому.

Будемо уявляти, що атоми твердого тіла – це кулі, які щільно заповнюють його об'єм. Візьмемо для прикладу кристал алюмінію. Густина алюмінію становить $2,7 \text{ г/см}^3$. Маса одного моля алюмінію – 27 г/моль . Тобто, в одному см^3 знаходиться $0,1$ моля алюмінію. Один моль кожної речовини має $6 \cdot 10^{23}$ атомів. Це значить, що в см^3 знаходиться $6 \cdot 10^{22}$ атомів алюмінію. На один атом припадає об'єм $1/(6 \cdot 10^{22}) \text{ см}^3 \approx 1,6 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$.

Звідси, лінійний розмір атома $\approx 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ см} = 2,6 \text{ \AA}$. За вимірами стала кристалічної ґратки алюмінію $\approx 4 \text{ \AA}$. Отже припущення, що стала ґратки одного порядку з розмірами атомів, підтверджується.

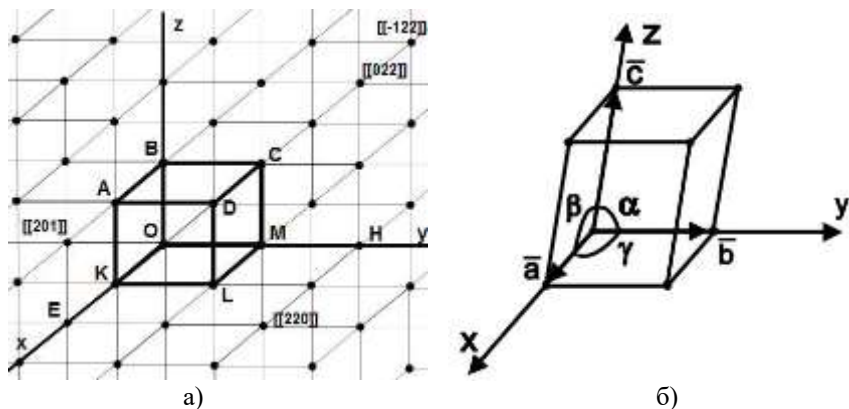


Рисунок 1.1

На рис. 1.1, а показана примітивна елементарна комірка в загальному вигляді.

Вектори $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ – *вектори трансляції*.

Їх абсолютна величина визначає три сталі кристалічної ґратки.

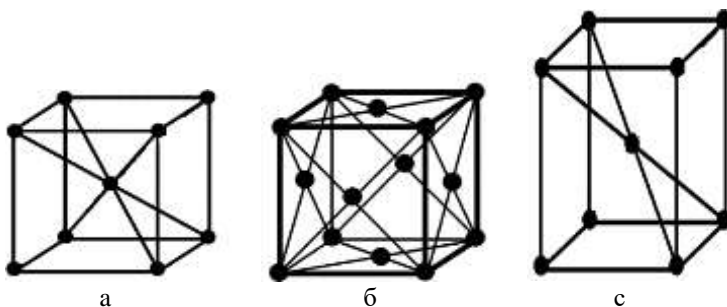
Ox, Oy, Oz – *основні кристалографічні напрямки*.

Параметри комірки для різних кристалічних сингоній мають такі значення, дивись табл. 1.1.

Таблиця 1.1

1. Кубічна	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;
2. Тетрагональна	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;
3. Ромбічна	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;
4. Ромбоєдрична	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$;
5. Гексагональна	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$;
6. Моноклінна	$a \neq b \neq c$	$\beta = \gamma = 90^\circ; \alpha \neq 90^\circ$;
7. Триклінна	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$.

Крім примітивних існують більш складні елементарні комірки (рис. 1.2).



а – об’ємноцентрована кубічна (ОЦК);
 б – гранецентрована кубічна (ГЦК);
 с – тетрагональна об’ємноцентрована.

Рисунок 1.2

Ромбічна сингонія крім примітивної має ще три типи:

а) об’ємноцентрована; б) гранецентрована; в) з центрованим базисом.

Моноклінна сингонія крім примітивної має решітку з центрованим базисом.

Вся сукупність примітивних і більш складних решіток становить 14 так званих **решіток Браве**.

Крім вказаних вище, кристалічна ґратка характеризується іншими параметрами.

Енергія кристалічної ґратки – це робота, яку необхідно виконати, щоб атоми кристалічної ґратки віддалити один від одного на нескінченність. Як правило, ця величина розраховується на 1 моль, або на один атом. Цю енергію називають також **енергією зв’язку**.

Координаційне число (K) – це число найближчих сусідів даного атома. Наприклад, у примітивній кубічній ґратці $K=6$, в ОЦК $K=8$, у ГЦК $K=12$.

Базис решітки – це число атомів, що припадає на одну елементарну комірку. Наприклад, для примітивної кубічної воно становить 1, для ОЦК – 2, а для ГЦК – 4. При підрахунках базису слід мати на увазі, що кожен атом входить до складу декількох сусідніх комірок.

Коефіцієнт компактності η – це відношення власного об’єму атомів до об’єму всієї ґратки. Чим більше координаційне число, тим більшим буде коефіцієнт компактності.

Наприклад, для кристалу алюмінію цей коефіцієнт становить

$$\eta = 4 \cdot V_{\text{ат}} / V_{\text{ком}}. \text{ Об’єм атома } V_{\text{ат}} = \frac{1}{6} \cdot d^3, \text{ де } d = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ см. Об’єм комірки } a^3,$$

де $a = 4 \cdot 10^{-8}$ см. Кристал алюмінію має ГЦК решітку, тому до неї належать чотири атоми. Маємо:

$$\eta = \frac{4 \cdot \frac{1}{6} \pi a^3}{a^3} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot (2,6)^3 \cdot (10^{-8})^3}{6 \cdot 4^3 \cdot (10^{-8})^3} = 0,86.$$

Найбільший коефіцієнт компактності мають кристалічні структури з найбільшим координаційним числом. Це ГЦК і гексагональна щільноупакована.

Знаючи базис решітки і параметри елементарної комірки можна розрахувати густину кристалу за формулою:

$$\rho = \frac{n \cdot \mu}{N_A \cdot V} \quad (1.1)$$

де n – базис решітки, μ – молярна маса речовини, N_A – число Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23}$ 1/моль), V – об'єм елементарної комірки.

Атомна або кристалічна площа – це площа в кристалі, що проходить через вузли кристалічної ґратки. Число атомів, що приходить на одиницю площі атомної площини називають **густиною упаковки**. Густина упаковки різних площин різна. Цим пояснюється неоднорідність фізичних властивостей кристалу вздовж різних напрямків. Ця неоднорідність називається **анізотропія**. Пряма лінія, що проходить через вузли кристалічної ґратки, називається **кристалографічним напрямком**.

Індекси Міллера. Якщо в кристалі який-небудь атом взяти за початок координат, то положення будь-якого іншого атома можна задати вектором:

$$\vec{r} = m\vec{a} + n\vec{b} + p\vec{c} \quad (1.2)$$

де $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ – вектори трансляції, а m, n, p – цілі числа.

Приймаючи a, b, c за одиниці масштабу, координати будь-якого атома будуть цілими числами m, n, p . Ці числа записують у подвійних квадратних дужках $[[mnp]]$ і називають **індексами Міллера**.

Індекси деяких вузлів показані на рис. 1.1, а. Якщо координата вузла від'ємна, то над цифрою ставиться знак (–) мінус $[[\bar{1}22]]$.

Якщо в кристалі необхідно вказати певний напрямок, то використовують індекси двох сусідніх вузлів, через які проходить ця пряма. При цьому один із вузлів приймають за початок координат, тобто його індекси нульові $[[000]]$. Індекси напрямів записують в квадратних дужках $[]$.

Наприклад, вісь (кристалографічний напрямок) OX має індекси $[100]$, вісь OY – $[010]$ напрямок OD на рис. 1.1, а – $[111]$ і т.д.

Для визначення індексів атомної площини необхідно встановити координати точок перетину цієї площини з осями координат; взяти обер-

нені значення цих величин; привести їх до найменшого цілого кратного. Отримані значення цілих чисел, що не мають загального множника, називаються **індексами Міллера для кристалографічної (атомної) площини**. Індекси площин записуються (*hkl*).

На рис. 1.1, а атомна площаина, частиною якої є грань *KADL*, має індекс (100), відповідно *DCLM* має індекси (010), а *ABDC* – (001).

Знайдемо індекси атомної площини, яка перетинає осі координат в точках Е, Н і В. Ці точки мають координати 2, 2 і 1. Візьмемо обернені значення $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1$. Приводимо до найменшого кратного (це буде 2). Тоді

$h = 1/2 \cdot 2 = 1$, $k = 1/2 \cdot 2 = 1$, $l = 1 \cdot 2 = 2$. Індекси цієї площини будуть (112). Читається: один, один, два.

Еквівалентні площини – це такі, розміщення атомів на яких однакове, тобто після суміщення площини всі атоми сумішуються.

1.2 Порядок виконання роботи

1. Обчислити густину конкретного кристалу за відомою молярною масою та типом решітки.
2. Обчислити відстань між найближчими сусідами в цьому кристалі.
3. Знайти густину атомів в атомних площинах (100), (110), (111).
4. Визначити індекси кристалографічного напрямку, що проходить через вказані в таблиці вузли.
5. Визначити індекси атомної площини, що перетинає осі координат в точках, координати яких вказані в таблиці 1.2.
6. Обчислити розмір атома та порівняти його з відстанню до найближчого сусіда. Зробити висновки.

Дані для виконання завдання взяти з приведеної нижче таблиці 1.2 відповідно до номера робочої групи.

1.3 Контрольні запитання

1. Що називають кристалічною ґраткою?
2. Дати визначення елементарної комірки.
3. Що таке стала кристалічної ґратки?
4. Привести значення геометричних параметрів кристалічних сингоній.
5. Дати визначення енергії ґратки, координаційного числа, базису та компактності.

6. Що таке атомна площина?

7. Що називають індексами Міллера вузлів, напрямлень, площин?

Таблиця 1.2

№ п/п	Речовина	Тип решітки	Молярна маса, г/моль	Стала решітки, Å	Координати вузлів для визначення напрямлення	Координати точок перетину атомної площини з осями координат
1	Алюміній	ГЦК	26,98	4,04	101, 121	100, 020, 002
2	Барій	ОЦК	137,3	5,01	111, 111	101, 021, 002
3	Ванадій	ОЦК	50,91	3,03	000, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$	100, 030, 003
4	Вольфрам	ОЦК	183,8	3,16	011, 022	100, 010, 002
5	Залізо	ОЦК	55,84	2,86	001, 022	100, 040, 003
6	Золото	ГЦК	196,96	4,07	023, 122	200, 010, 001
7	Мідь	ГЦК	63,54	3,61	110, 021	200, 020, 002
8	Молібден	ОЦК	95,9	3,14	110, 141	200, 030, 001
9	Натрій	ОЦК	22,99	4,28	220, 111	200, 040, 003
10	Платина	ГЦК	195	3,92	211, 111	300, 010, 001
11	Свинць	ГЦК	207,2	4,94	312, 211	300, 020, 001
12	Срібло	ГЦК	107,87	4,08	423, 523	300, 030, 001
13	Тантал	ОЦК	180,95	3,30	132, 231	300, 030, 003
14	Хром	ОЦК	51,99	2,88	212, 123	300, 020, 002

Література

1. Ч. Киттель, Элементарная физика твёрдого тела. – М.: Наука, 1965.
2. Елифанов Г.М. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1977.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ЕЛЕМЕНТИ ФІЗИЧНОЇ СТАТИСТИКИ

Мета роботи – ознайомитися з фізичною статистикою Максвелла-Больцмана.

2.1 Загальні відомості

В цій роботі необхідно зробити експериментальне дослідження розподілу електронів, які вилітають з гарячого катоду електровакуумної лампи по енергіям і порівняти отримані результати з розподілом Максвелла-Больцмана.

Між молекулярно-кінетичною будовою фізичної системи і її макроскопічними властивостями існує однозначний зв'язок. Визначенням цього зв'язку займається *фізична статистика*.

Задача фізичної статистики – знаходження функції розподілу частинок, які складають конкретну систему, за такими параметрами, як енергія, швидкість, імпульс, довжина вільного пробігу та ін. При цьому значення кожного з них параметрів для конкретної частинки виявляється випадковою величиною.

Припустимо, що відома функція розподілу частинок по абсолютному значенню швидкості $f(v)$. Тоді ймовірність того, що для окремо взятої частинки (молекули) в деякий момент часу швидкість знаходиться в інтервалі від v до $v + dv$, визначається співвідношенням:

$$dw(v) = f(v)dv. \quad (2.1)$$

Вигляд функції розподілу випадкової величини $f(x)$ залежить від властивостей частинок. Якщо рух частинок підкоряється законам класичної механіки, то в цьому випадку буде *класична статистика* (статистика Максвелла-Больцмана); якщо рух частинок підкоряється законам квантової механіки, то тоді буде *квантова статистика* (Фермі-Дірака або Бозе-Ейнштейна).

Функція розподілу Максвелла-Больцмана (М-Б) має вигляд:

$$f(E) = A \cdot e^{-E/kT}, \quad (2.2)$$

де E – енергія частинки; A – нормуючий множник; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура.

За допомогою цієї функції визначають ймовірність того, що частинка має координати x, y, z в інтервалах $x, x + dx; y, y + dy; z, z + dz$ і імпульси P_x, P_y, P_z в інтервалах $P_x, P_x + dP_x; P_y, P_y + dP_y; P_z, P_z + dP_z$.

Ймовірність того, що частинка має енергію в інтервалі від E до $E + dE$:

$$dw(E) = f(E) \cdot dE = \frac{2}{\sqrt{\pi}(kT)^{3/2}} \cdot E^{1/2} \cdot e^{-E/kT} dE. \quad (2.3)$$

Якщо загальну кількість частинок в системі N помножити на ймовірність, то отримаємо число частинок dN , що мають енергію в межах вказаного інтервалу, тобто:

$$dN = \frac{2N}{\sqrt{\pi}(kT)^{3/2}} \cdot E^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE. \quad (2.4)$$

Звідки отримуємо:

$$f(E) = \frac{dN}{NdE}. \quad (2.5)$$

На рис. 2.1 показано графік функції розподілу по енергіям. Графік функції $f(E)$ і вісь абсцис обмежують частину координатної площини, площа яка дорівнює одиниці. Нормуючий множник $A = 2\pi^{-1/2} \cdot (kT)^{-3/2}$

підібрано так, щоб інтеграл $\int_0^{\infty} f(E) dE$ дорівнював одиниці. Рівняння

$\int_0^{\infty} f(E) dE = 1$ називають умовою нормування функції розподілу.

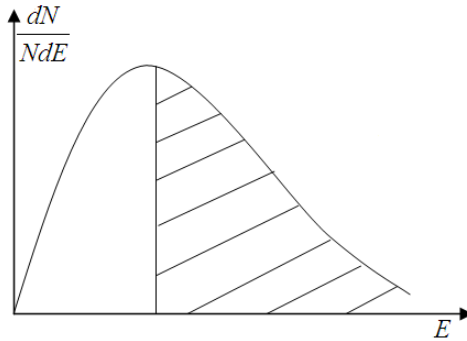


Рисунок 2.1

Розглянемо рис. 2.2. Площа заштрихованої частини дорівнює відносній частині тих частинок, енергія яких більша ніж E_0 . Абсолютне число таких частинок N визначається інтегралом:

$$\Delta N = 2N\pi^{-\frac{1}{2}}(kT)^{-\frac{3}{2}} \int_{E_0}^{\infty} E^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE, \quad E > E_0. \quad (2.6)$$

Якщо $E \gg kT$, то можна скористатися наближеним співвідношенням:

$$\Delta N \approx (\pi kT)^{-1/2} \cdot 2NE_0^{1/2} e^{-E_0/kT}. \quad (2.7)$$

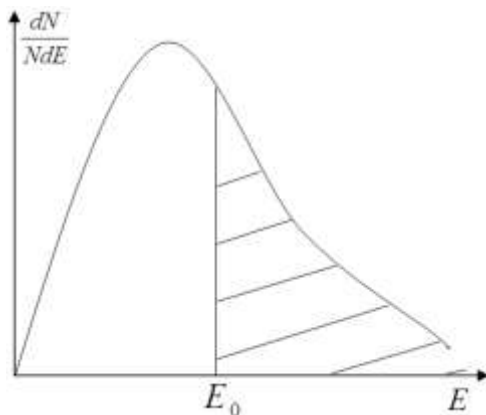


Рисунок 2.2

Квантова статистика Фермі-Дірака (Ф-Д) використовується для систем квантових частинок з напівцілим спіном. Для таких частинок виконується принцип Паулі, у відповідності з яким в кожному квантовому стані може бути лише одна частинка.

Функція розподілу Ф-Д визначає ймовірність заповнення квантового стану з енергією E і має такий вигляд:

$$f_{\text{Ф-Д}} = \left[\exp \frac{E - \mu}{kT} + 1 \right]^{-1}. \quad (2.8)$$

Графік цієї функції показано на рис. 2.3. Величину μ називають **хімічним потенціалом**, або **енергією Фермі**. Числове значення цієї енергії дорівнює роботі, яку необхідно виконати, щоб змінити число частинок в системі на одну.

Із рис. 2.3 можна бачити, що при $T=0$ ймовірність заповнення всіх станів з енергією меншою ніж μ дорівнює 1, тобто всі вони заповнені, а ті які мають енергію $E > \mu$ – всі вільні. При $T > 0$ відбувається часткове заповнення станів з енергією $E > \mu$.

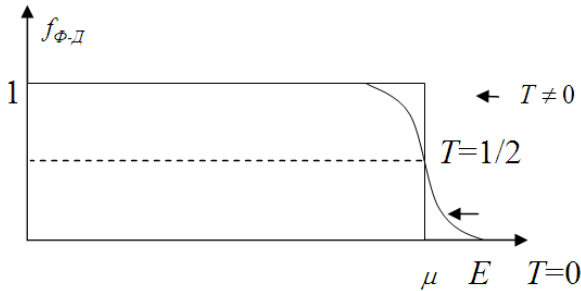


Рисунок 2.3

Для тих станів, де виконується умова $E - \mu \gg kT$, буде справедлива функція розподілу М-Б. Дійсно, якщо $E - \mu \gg kT$, то $\exp\left(\frac{E - \mu}{kT}\right) \gg 1$ і одиницею в функції Ф-Д можна знехтувати. При цьому функція Ф-Д набуває такого вигляду:

$$f_{\Phi-D} = e^{\mu/kT} \cdot e^{-E/kT}, \quad (2.9)$$

що практично співпадає з функцією М-Б (2.2).

Функція розподілу Ф-Д описує вироджені системи. Прикладом такої системи є електронний газ в металах. Електронний газ в напівпровідниках в більшості випадків неvirоджений. До нього можна застосувати статистику М-Б. Для електронів в металах, котрі мають таку енергію, що $E - \mu \gg kT$, також слід використовувати статистику М-Б. При збільшенні температури частка таких електронів збільшується і частина з них може залишити метал. Виникає **явище термоелектронної емісії**. В зв'язку з цим, треба сподіватися, що електрони які покидають метал внаслідок термоемісії, підкоряються статистиці М-Б.

Це припущення можна перевірити за допомогою електронної лампи (діода), використовуючи методику затримуючого потенціалу. На рис. 2.4 показана принципова схема цього методу.

Джерело E_2 необхідне для подавання на анод затримуючого потенціалу U_3 . Мікроамперметр G вимірює величину струму, який виникає внаслідок того, що частина електронів, які вилітають із катоду, попадають на анод. Напевно із катода вилітають тільки ті електрони, що мають енергію E не меншу, ніж робота виходу A_v . Оскільки робота виходу складає декілька еВ, а при температурі катоду $T \approx 10^3$ К, $kT = 0,1$ еВ, то умова $E \gg kT$, буде завжди виконуватись. Враховуючи цю обставину записуємо, що число електронів, які вилітають із катоду, визначається співвідношенням:

$$N = BA_{\phi}^{1/2} \exp\left(-\frac{A_{\phi}}{kT}\right), \quad (2.10)$$

де B – коефіцієнт пропорційності.

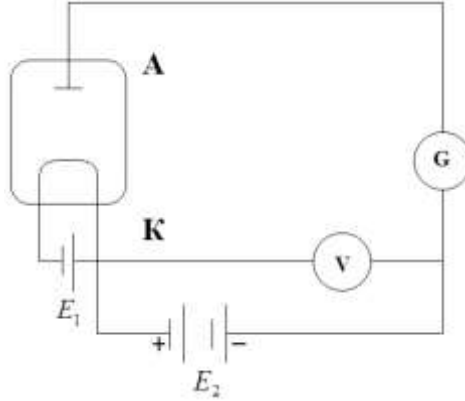


Рисунок 2.4

Повний струм, величина якого буде виміряна G , очевидно пропорційний числу електронів, що покинули метал, тобто:

$$I = CA_{\phi}^{1/2} \exp\left(-\frac{A_{\phi}}{kT}\right), \quad (2.11)$$

де C – новий коефіцієнт.

Якщо від джерела E_2 подати на анод від'ємний потенціал U_3 відносно катода, то це буде еквівалентно збільшенню роботи виходу на eU_3 , де e – заряд електрона. Струм I при цьому зменшиться і буде визначатися за формулою:

$$I = C(A_{\phi} + eU_3)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{A_{\phi} + eU_3}{kT}\right), \quad (3.12)$$

або

$$I = C(A_{\phi} + eU_3)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{A_{\phi}}{kT}\right) \exp\left(-\frac{eU_3}{kT}\right). \quad (3.13)$$

Після логарифмування, одержуємо:

$$\ln I = \ln \left[C(A_{\phi} + eU_3)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{A_{\phi}}{kT}} \right] - \frac{eU_3}{kT}. \quad (3.14)$$

Можна вважати, що $A_{\phi} \gg eU_3$. Завдяки цьому будемо рахувати, що:

$$\ln \left[C(A_g + eU_3)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{A_g}{kT}} \right] \approx \ln [CA_g^{1/2} e^{A_g/kT}] = \ln I_0. \quad (3.15)$$

Нарешті отримуємо:

$$\ln I = \ln I_0 - \frac{eU_3}{kT}. \quad (3.16)$$

Із останньої формули бачимо, що залежність $\ln I = f(U_3)$ – лінійна. Це показано на рис. 2.5.

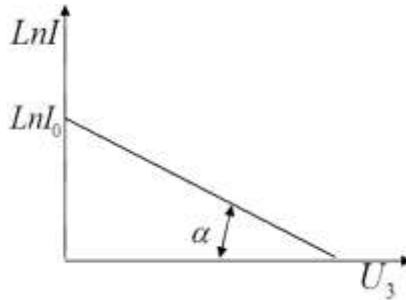


Рисунок 2.5

При проведенні вимірювань треба мати на увазі, що залежність $\ln I = f(U_3)$ може значно відрізнятися від лінійної.

Ця розбіжність буде особливо помітна при малих U_3 і великих температурах катоду. Причина цього – просторовий заряд, що утворюється електронами, які вилітають із катоду. Цей заряд збільшується з підвищенням температури катоду. В зв'язку з цим, вимірювання необхідно виконувати, по можливості, при малих температурах.

2.2 Порядок виконання роботи

2.2.1 Завдання 1

1. Побудувати криву розподілу термоелектронів по енергіям і порівняти її з функцією М-Б.
2. Визначити температуру T електронного газу.

Прилади і обладнання.

1. Електронна лампа (діод).
2. Міліамперметр для вимірювання сили струму розжарювання катоду.
3. Мікроамперметр для вимірювання струму через діод.

4. Вольтметр для вимірювання затримуючого потенціалу.
5. Потенціометр R1.
6. Реостат R2 в колі розжарювання катоду.

Хід виконання.

1. Ознайомитися з електричною схемою лабораторної установки, яка зображена на рис. 2.6 (позначення приладів див. вище).

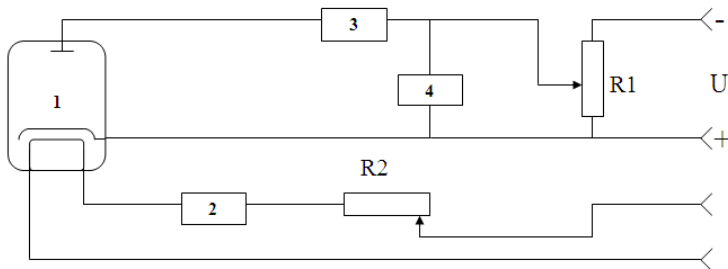


Рисунок 2.6

2. Включити установку. За допомогою R2 виставити необхідний струм розжарення I_p і підтримувати його постійним. Нагрівання катоду потрібно продовжувати 5-10 хвилин. Збільшуючи за допомогою R1 затримуючий потенціал U_3 , зняти залежність I від U_3 . Результати вимірювань занести до таблиці 2.1.

3. За даними таблиці 2.1 побудувати графіки залежностей $I = f(U_3)$ та $\Delta I = f(U_3)$. Графік залежності $\Delta I = f(U_3)$ характеризує розподіл термоелектронів по енергіям. Для побудови цього графіка необхідно на середині кожного інтервалу затримуючої напруги побудувати в напрямку осі ординат відрізок, який у підбраному масштабі дорівнює тому I , що відповідає цьому інтервалу напруги. Необхідно порівняти отриману криву з теоретичною для розподілу молекул ідеального газу по енергіям. Якщо буде значна розбіжність, то необхідно пояснити її правдоподібними припущеннями.

4. Побудувати графік залежності $\ln I = f(U_3)$, вид якого має бути таким як на рис. 2.7.

5. Взявши координати крайніх точок прямолінійної ділянки залежності $\ln I = f(U_3)$ визначати температуру T термоелектронного газу за формулою:

$$T = \frac{e(U_{32} - U_{31})}{k(\ln I_1 - \ln I_2)}, \quad (3.17)$$

де $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електрону; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана.

Таблиця 2.1

№, п/п	Затримуючий потенціал U_3 , В	Анодний струм I , мкА	Зміна анодного струму $\Delta I = (I_n - I_{n+1})$, мкА	$\ln I$
1				
2				
...				
10				

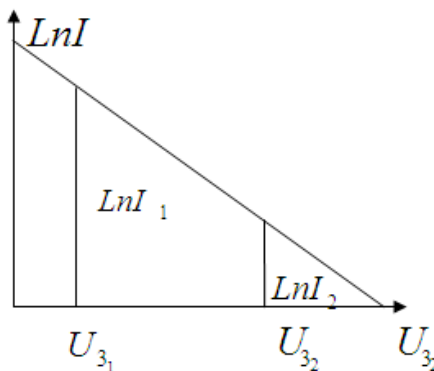


Рисунок 2.7

6. Зробити висновки про можливість застосування класичної статистики до термоелектронів, звернувши особливу увагу на форму графіка і значення температури T електронного газу.

2.2.2 Завдання 2

1 Побудувати графік розподілу термоелектронів по енергіям, порівняти його з графіком функції Максвела-Больцмана (М-Б).

2 Визначити температуру T електронного газу.

Прилади і обладнання.

1. Цифровий мультиметр – 3 шт.
2. Електронна лампа (подвійний діод) 6Х2П – 1 шт.
3. Джерело постійного струму АС-DC з вихідною напругою 6 В – 1 шт.
4. Електролітичний конденсатор 4700мкФ 16В – 2 шт.
5. З'єднувальні провідники.

Хід виконання.

1. Зібрати робочу схему згідно з монтажною (рис. 2.8).
2. Виставити межі вимірювань на мультиметрах: 1 – «2000 mV», 2 – «2000 mV», 3 – «200 μ A».
3. Ввімкнути джерело постійного струму до мережі. Вихідна напруга на джерелі $U=6$ V.
4. Проводимо пробний експеримент в ході якого визначаємося з шагом зміни напруги на 2 mV. Вимикаємо струм розжарення. Розряджаємо конденсатор. Повторно подаємо струм розжарення. Показання мілівольтметра (прилад 1) необхідні для контролю температури катодів. Одночасно знімаємо показання з мілівольтметра (прилад 2) та мікроамперметра (прилад 3) та заносимо до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

№, п/п	U , mV	I , μ A	ΔI , μ A	$\ln I$

5. Побудувати графіки залежностей $I = f(U)$, $\Delta I = f(U)$, $\ln I = f(U)$.

6. Порівняти отриманий графік залежності $\Delta I = f(U)$ з графіком функції М-Б.

7. З графіка $\ln I = f(U)$ визначити температуру T електронного газу:

$$T = \frac{e(U_2^3 - U_1^3)}{k(\ln I_1 - \ln I_2)}, \quad (2.18)$$

де $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електрона, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана.

8. Зробити висновки про можливість застосування класичної статистики до термоелектронів, звернувши особливу увагу на форму графіка $\Delta I = f(U)$ і значення температури T електронного газу.

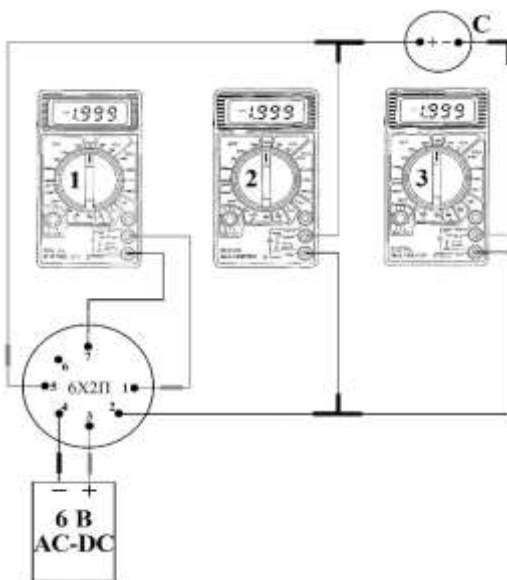


Рисунок 2.8

2.3 Контрольні запитання

1. Що таке функція розподілу? Що можна розрахувати за допомогою функції розподілу?
2. Який вигляд мають функції розподілу Максвелла-Больцмана і Фермі- Дірака?
3. Що таке умова нормування? Який її фізичний зміст?
4. Що таке енергія Фермі? При якій умові функція Фермі-Дірака перетворюється у функцію Максвелла- Больцмана?
5. Що таке термоелектронна емісія?
6. Як впевнитись, що експериментальна залежність відповідає теоретичній?
7. Як залежить сила струму емісії в електронній лампі від температури катоду?
8. Що таке робота виходу і як вона впливає на силу струму при термоелектронній емісії?

Література

1. Епифанов Г.М. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1977.

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Мета роботи – вивчити явище електропровідності твердих тіл.

3.1 Загальні відомості

Явище електропровідності у твердих тілах пов'язане з переміщенням вільних зарядів під дією електричного поля. Таке переміщення зарядів приводить до зміни їх енергії. Можливі значення енергії електронів у твердих тілах утворюють смуги енергії, які називають **енергетичними зонами**. Оскільки електропровідність викликана рухом валентних електронів, то її особливості зумовлені характером заповнення валентними електронами квантових станів енергетичної зони, яка називається **валентною зоною**. При температурах T , близьких до 0°K , можливі два випадки:

а) квантові стани валентної зони повністю заповнені електронами. Тверде тіло з такою валентною зоною буде погано проводити електричний струм, тому що валентні електрони не можуть рухатись під дією зовнішнього електричного поля. Цей рух приводив би до зміни їх енергії, що мусить супроводжуватись переходом електронів в інші квантові стани. Але всі стани зайняті і переходити нікуди. Це тверде тіло – **діелектрик**;

б) якщо квантові стани валентної зони заповнені електронами частково, то вказаних обмежень на їх рух під дією зовнішнього електричного поля не існує. Тверді тіла з таким заповненням валентної зони добре проводять струм – це гарні **провідники**. Дослід показує, що високу електропровідність мають метали. Отже, в металах квантові стани валентної зони заповнені електронами частково.

Встановлено, що електропровідність напівпровідників з підвищенням температури різко збільшується, на відміну від металів, де вона монотонно знижується. Зростання електропровідності напівпровідників із збільшенням температури зонна теорія твердого тіла пояснює так: над валентною енергетичною зоною розташована зона збуджених станів. Ця зона відділена від валентної зони смугою заборонених енергій, тобто таких значень енергій, які вільний електрон не може мати. Ці енергії утворюють **заборонену зону**. Енергетична **ширина забороненої зони** позначається ΔE_g . Цей параметр є важливою характеристикою оптичних та електричних властивостей напівпровідників.

Із збільшенням температури деякі електрони валентної зони переходять в зону збуджених станів. Зона збуджених станів в цьому випадку буде частково заповнена електронами, які під дією зовнішнього електрич-

ного поля будуть рухатись так, як в металах. З цієї причини ця зона називається **зоною провідності**. Ймовірність переходу електронів із валентної зони в зону провідності визначається у відповідності із статистикою Максвелла – Больцмана виразом:

$$W = A \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right), \quad (3.1)$$

де k – стала Больцмана, A – нормуючий множник.

Отже, концентрація вільних електронів у зоні провідності змінюється з T за формулою:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right), \quad (3.2)$$

де n – концентрація вільних електронів при температурі T . Згідно з електронною теорією електропровідності, вираз для питомої провідності має вигляд:

$$\sigma = en\mu, \quad (3.3)$$

де e – заряд електрона, n та μ – концентрація і рухливість електронів.

Експеримент показує, що рухливість μ із збільшенням температури у металах зменшується. Аналогічна залежність $\mu(T)$ спостерігається в напівпровідниках і в ізоляторах при помірних температурах. Але для напівпровідників температурна залежність концентрації значно більш сильна, ніж рухливості, і тому вважають:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E_g}{2kT}}, \quad (5.4)$$

де σ_0 – стала величина.

Звідси впливає принципова відмінність залежності $\sigma(T)$ напівпровідників від металів. В металах, із збільшенням температури σ зменшується, а в напівпровідниках – стійко зростає. Відмінність між напівпровідниками і діелектриками має умовний характер. Якщо ширина забороненої зони не перевищує 3eV – це **напівпровідник**, а якщо більше – **діелектрик**.

У напівпровідниках провідність здійснюється не тільки вільними електронами зони провідності, але і за рахунок переміщень вакансій валентних електронів, які перейшли у зону провідності. Ці вакансії мають позитивний заряд. Концентрація вакансій у власних напівпровідниках дорівнює концентрації вільних електронів. Ці вакансії називають дірками. Рухливість дірок значно нижча рухливості електронів. Вираз для питомої провідності власного напівпровідника має вигляд:

$$\sigma = en(\mu_n + \mu_p), \quad (3.5)$$

де μ_n і μ_p – рухливість електронів і дірок.

Для визначення ширини забороненої зони ΔE_g використовується залежність зворотного струму насичення германієвого діоду від температури. Густина струму $j = \sigma E$. E – напруженість електричного поля в провіднику. Для ділянки провідника довжиною L , $E = U/L$, де U – напруга на цій ділянці провідника. Весь струм $I = jS$, де S – площа поперечного перерізу провідника. Отримуємо:

$$\frac{I}{S} = \sigma \frac{U}{L} \Rightarrow I = \sigma \cdot S \frac{U}{L}.$$

Величину $S \frac{U}{L}$ можна вважати сталою, а $\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right)$.

Тоді при сталій напрузі, що прикладена до напівпровідникового зразка, залежність струму від температури має вигляд:

$$I = \sigma_0 S \frac{U}{L} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right). \quad (3.6)$$

Якщо взяти натуральний логарифм від (3.6), то отримаємо:

$$\ln I = \ln\left(\sigma_0 S \frac{U}{L}\right) - \frac{\Delta E_g}{2kT}. \quad (3.7)$$

Графік функції $\ln I = f(1/T)$ для напівпровідника має вигляд прямої лінії, як це показано на рис. 3.1.

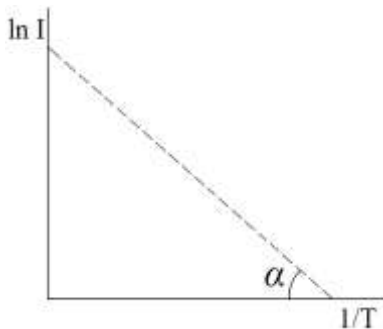


Рисунок 3.1

Із виразу (3.7) видно, що тангенс кута нахилу прямої $\ln I = f(1/T)$ дорівнює:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta E_g}{2k} \Rightarrow \Delta E_g = 2k \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.8)$$

Для знаходження $tg\alpha$ і відповідно ΔE_g потрібно побудувати графік $\ln I = f(1/T)$, а для цього потрібно експериментально встановити значення струму через напівпровідник при різних температурах.

Дослід і теорія p - n переходів (діодів) із германію вказують на те, що зворотний струм насичення I_S збільшується із зростанням температури T відповідно до формули (3.6). На рис. 3.2 показані вольт-амперні характеристики германієвого p - n переходу для зворотного напрямку при різних температурах.

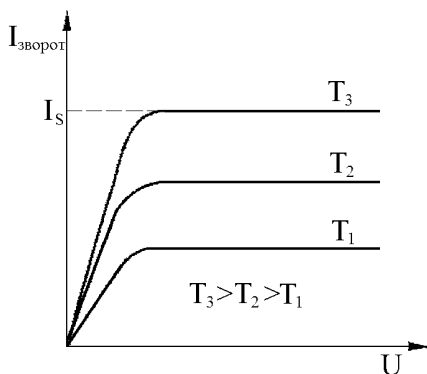


Рисунок 5.2

3.2 Порядок виконання роботи

3.2.1 Завдання 1

1 Отримати залежність сили струму I напівпровіднику від температури T .

2 За допомогою отриманого графіка визначити ширину забороненої зони ΔE_g германію.

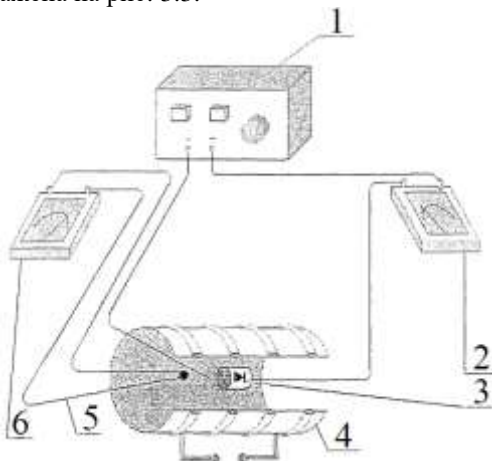
3 Порівняти отримане значення ΔE_g з довідковим.

Прилади і обладнання.

1. Джерело постійного струму В-24М (чи інше).
2. Діод з германію (наприклад Д7Ж).
3. Вольтметри-амперметри.
4. Термопара.
5. Електрична пічка.
6. Провідники.

Хід виконання.

1. Ознайомитися з електромонтажною схемою лабораторної установки, яка зображена на рис. 3.3.



1 – джерело постійного струму В-24М (чи інше); 2 – прилад для вимірювання зворотного струму діода (прилад М-2018, шкала на 1,5 мА); 3 – досліджуваний діод; 4 – хромель-копелєва (ХК) термопара для вимірювання T в пічці; 5 – електропіч для нагрівання діода; 6 – прилад для вимірювання електрорушійної сили (ЕРС) термопари (прилад М-2018, або інший), шкала 15 mV

Рисунок 3.3

2. Підключити пічку (5) та джерело (1) до електричної мережі змінного струму 220 В.

3. Від джерела (1) подати на діод напругу $U=10$ В. Напруга контролюється по вольтметру, який розташований на лицевій панелі джерела (1).

4. Занести показання приладів (2) і (6) до таблиці 3.1.

5. ЕРС термопари перевести в $^{\circ}\text{C}$, використовуючи такі дані для термопари, наприклад $\Delta t^{\circ}\text{C} \approx 14,4^{\circ}\text{C}$.

Це означає, що температура в пічці вища від кімнатної на $14,4^{\circ}\text{C}$.

6. Визначити абсолютну температуру T діода за формулою $T = 273 + t_k + \Delta t$, де t_k – кімнатна температура. Знайти значення $1/T$ та занести до табл. 3.1.

Увага! Необхідно уважно стежити за температурою в пічці і не нагрівати діод вище $120\div130^{\circ}\text{C}$.

Показання приладів краще знімати при охолодженні діода в пічці. Внаслідок теплової інерції більш надійні експериментальні дані будуть при більш повільному охолодженні, тобто в кінці охолодження.

Таблиця 3.1

№ з/п	ЕРС термопар, мВ	Різниця Δt між температурою діода та кімнатною, °C	Абсолютна температура T діоду, К	$1/T$, К ⁻¹	Сила зворотного струму I , в поділках шкали М-2018	$\ln I$, в поділках шкали
1						
2						
...						
10						

7. Знайти $\ln I$ та побудувати графік залежності $\ln I = f(1/T)$. Знайти із графіка $tg \alpha$ і за формулою (3.3) обчислити ΔE_g .

8. Порівняти отриманий результат з довідковим ($\approx 0,7$ еВ).
1 еВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

9. Зробити висновки.

3.2.2 Завдання 2

Визначити ширину забороненої зони ΔE_g германію.

Прилади і обладнання.

1. Цифровий мультиметр з термопарою – 1 шт.
2. Цифровий мультиметр – 1 шт.
3. Досліджуваний германієвий діод D9 – 1 шт.
4. Дротяна піч – 1 шт.
5. Джерело постійного струму AC-DC з вихідною напругою 6 В – 1 шт.
6. З'єднувальні провідники.

Хід виконання.

1. Зібрати робочу схему згідно з монтажною (рис. 3.4).

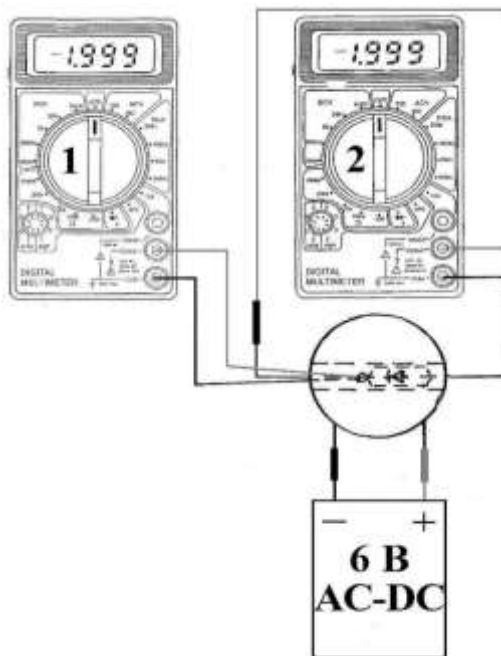


Рисунок 3.4

2. Розташувати у циліндричній порожнині дрітної печі спай термомпери та досліджуваний діод.

3. Виставити межі вимірювань на приладах: прилад 1 – «TEMP °C» для вимірювання температури; прилад 2 – «2000 Ω» для вимірювання опору діода, включеного у запірному напрямку.

4. Ввімкнути джерело постійного струму до мережі.

5. Після розігріву печі з діодом та термопарою при досягненні температури 85°С вимкнути джерело струму від мережі.

6. Омметром (прилад 2) через кожні 5° С знімати значення опору діода, який остигає та заносити до табл. 3.2. У разі необхідності перемкнути омметр на іншу межу вимірювання.

Таблиця 3.2

№, п/п	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	T, K	$1/T, \text{K}^{-1}$	R, Om	$\ln R$	$\Delta E_g, \text{eV}$
1	80					
2	75					
...	...					
12	25					

7. За результатами експерименту побудувати графік залежності $\ln R = f\left(\frac{1}{T}\right)$.

8. За формулою $\Delta E_g = 2k \cdot \operatorname{tg} \alpha$, де $\operatorname{tg} \alpha$ – тангенс кута нахилу прямої на графіку, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана, розрахувати ширину забороненої зони ΔE_g германію.

9. Порівняти отриманий результат з довідковим ($\approx 0,7$ еВ).

10. Зробити висновки.

3.3 Контрольні запитання

1. Що таке валентна зона, заборонена та зона провідності?
2. Чим відрізняється електропровідність металів від напівпровідників?
3. Як залежить опір напівпровідника від температури (прямо пропорційно, обернено пропорційно, чи ще якимось чином)?
4. Що таке термо ерс?
5. Що таке рухливість зарядів?
6. Як розрахувати питому електропровідність власного напівпровідника?
7. У скільки разів зміниться струм через зразок з германію при сталій напрузі, якщо температура підвищиться від 27°C до 87°C ?

Література

1. Елифанов Г.М. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1977.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ МЕТАЛІВ

Мета роботи – дослідити залежність опору металів від температури.

4.1 Загальні відомості

Встановлена експериментальна залежність електричного опору металів від температури в діапазоні 100÷200 градусів біля кімнатної температури досить точно описується формулою

$$R_T = R_0 (1 + \alpha \cdot T), \quad (4.1)$$

де R_0 – опір при 0 °C, T – температура в °C, α – температурний коефіцієнт опору (ТКО). Для більшості чистих металів α становить приблизно $4 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$.

Якщо взяти від (4.1) диференціал, то отримаємо:

$$dR_T = R_0 \alpha \cdot dT. \quad (4.2)$$

Звідси отримаємо визначення для температурного коефіцієнта опору:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT}. \quad (4.3)$$

З (4.1) видно, що графічна залежність R_T від T повинна мати вид прямої лінії і це показано на рис. 4.1.

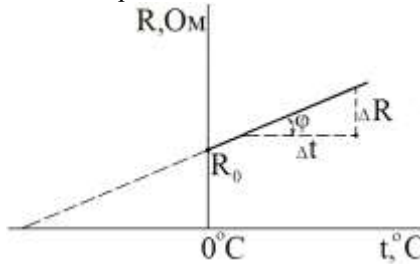


Рисунок 4.1

Величина $\alpha \cdot R_0$, буде кутовим коефіцієнтом цієї лінійної залежності, тобто

$$\alpha \cdot R_0 = \frac{\Delta R}{\Delta T}. \quad (4.4)$$

Чим більшим буде ΔR і ΔT , тим точніше визначимо αR_0 і відповідно, ТКО.

4.2 Порядок виконання роботи

4.2.1 Завдання 1

- 1 Дослідити залежність опору мідного дроту від температури і визначити температурний коефіцієнт опору (α).
- 2 Порівняти довідкове значення α для міді з отриманим.
- 3 Визначити питомий опір міді.
- 4 Визначити систематичну похибку при вимірах температури.

Прилади і обладнання.

1. Джерело постійного струму В-24М (чи інше).
2. Мідний дріт.
3. Вольтметри-амперметри.
4. Термопара.
5. Електрична пічка.
6. Провідники.

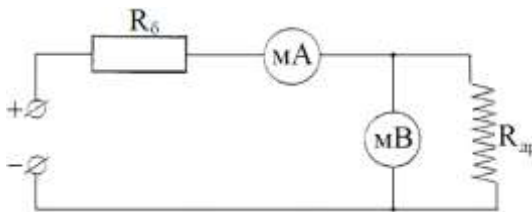
Хід виконання.

Для вимірювання використовуємо вертикальну електричну пічку, в якій розміщуємо термопару ХК (хромель-копель) і невеличкий моток мідного дроту. Діаметр дроту $d \approx 0,1$ мм, а його довжина $l \approx 1,5$ м

Опір R мідного дроту визначаємо за допомогою закону Ома для ділянки кола: $R = U/I$.

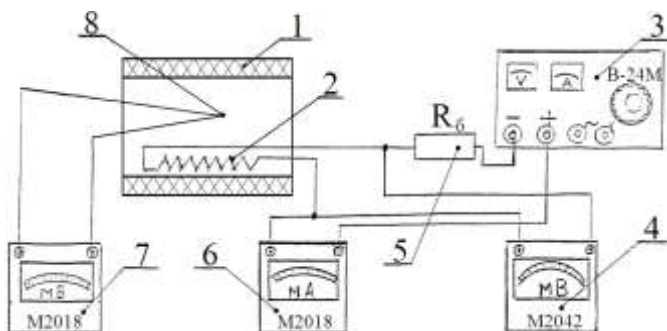
Напругу U на кінцях мідного дроту вимірюємо мілівольтметром, а силу струму I через мідний дріт – міліамперметром.

Електрична схема експериментальної установки показана на рис. 4.2, монтажана – на рис. 4.3.



“+ –” – джерело постійного струму; R_0 – баластний опір (≈ 2500 Ом); (mA) – міліамперметр для вимірювання струму, що протікає через (mV) і R_d ; (mV) – мілівольтметр, який вимірює падіння напруги на мідному дроті R_d

Рисунок 4.2



1 – електропіч (живлення 220В); 2 – досліджуваний мідний дріт; 3 – джерело постійного струму; 4 – мілівольтметр (шкала 10 $\mu\text{В}$ і вона ж буде мілівольтметром на 63 мВ); 5 – $R_{\text{дод.}}$ – додатковий опір ($\approx 2,5 \text{ кОм}$); 6 – міліамперметр (шкала 7,5 мА, множник – 2, $7,5 \cdot 2 = 15 \text{ мА}$); 7 – мілівольтметр для виміру ЕРС термопари 8 (шкала 15 мВ, опір мілівольтметра 21 Ом. Опір термопари $\approx 1,5 \text{ Ом}$).

Рисунок 4.3

1. Робимо виміри при кімнатній температурі. Для цього вмикаємо джерело постійного струму в електричну мережу і за допомогою регулятора на джерелі виставляємо струм по міліамперметру 10 мА. Цей струм при подальших вимірах практично залишається сталим. Результати вимірів і обчислень заносимо до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

№ з/п	$T, \text{ мВ}$	$T, ^\circ\text{C}$ (вище кімнат.)	Напруга на $R_{\text{д.}}$ мВ		Сила струму через $R_{\text{д.}}$ мА		Опір $R_{\text{д.}}$ Ом	α , 1/град
			на-грів.	охо-лод.	на-грів.	охо-лод.		

2. Вмикаємо електропіч і робимо виміри при температурах, коли ЕРС термопари становить 1 мВ, 2 мВ ... до 7 мВ.

Увага! Нагрівати електропіч вище 7 мВ категорично забороняється.

3. Після цього електропіч вимикаємо і виміри повторюємо при охолодженні.

4. Знаходимо середнє арифметичне значення сили струму I та напруги U для кожної температури та використовуємо для розрахунку опору R_d мідного дроту. Завдяки тому, що опір мілівольтметра (21 Ом) не набагато більший від опору термопари (1,5 Ом), виникає систематична похибка при визначенні температури. Цю похибку необхідно обчислити в % і зробити висновок, яка буде дійсна температура в пічці.

5. Після обчислення опору мідного дроту R_d для різних температур необхідно побудувати графік залежності $R_d = f(T^\circ \text{C})$. Шкалу температур на графіку потрібно починати з 0°C (див. рис. 4.1).

6. За допомогою графіка визначити R_0 , $\text{tg } \varphi$ та за формулою (4.4) знайти α .

7. Порівняти отримане значення α з довідковим (для міді довідкове $\alpha=4,3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/рад}$).

8. Обчислити питомий опір для міді, використовуючи формулу опору $R = \rho l/S$ де ρ – питомий опір, l – довжина провідника, S – площа поперечного перетину.

9. По отриманим результатам зробити висновки.

4.2.2 Завдання 2

1 Побудувати графік залежності опору мідного дроту від температури та визначити температурний коефіцієнт опору α для міді.

2 Визначити питомий опір ρ міді.

Прилади і обладнання.

1. Цифровий мультиметр з термопарою – 1 шт.
2. Цифровий мультиметр – 1 шт.
3. Дротяна піч – досліджуваний зразок з міді ($l=12 \text{ м}$, $d=0,27 \text{ мм}$) – 1 шт.
4. Джерело постійного струму АС-DC з вихідною напругою 6 В – 1 шт.
5. З'єднувальні провідники.

Хід виконання.

1. Зібрати робочу схему згідно з монтажною (рис. 4.4).
2. Розташувати у циліндричній порожнині дротяної печі спай термопари.
3. Виставити межі вимірювань на приладах: прилад 1 – «ТЕМР $^\circ\text{C}$ » для вимірювання температури; прилад 2 – «2000 Ω » для вимірювання опору мідного дроту.
4. Ввімкнути джерело постійного струму до мережі.
5. Після розігріву печі (досліджуваного зразка з міді) з термопарою при досягненні температури 85°C вимкнути джерело струму від мережі.

6. Починаючи з 80 °С через кожні 5 °С знімати значення показань омметра (прилад 2) та заносити до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

№ з/п	$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$\alpha, 1/\text{рад}$	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{м}$
1	80			
2	75			
...	...			
12	25			

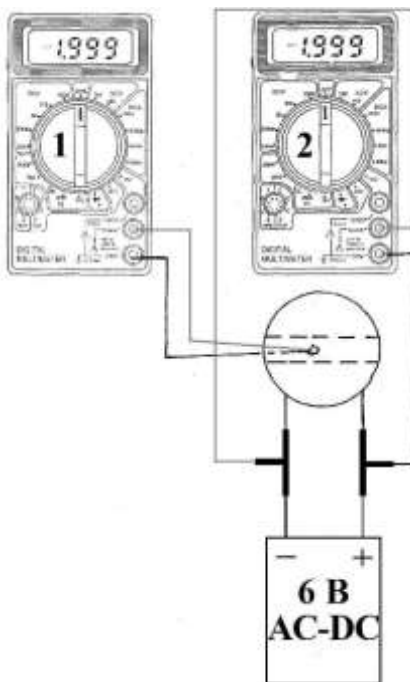


Рисунок 4.4

7. За результатами експерименту побудувати графік залежності $R = f(t)$. Шкалу температур на графіку потрібно починати з 0 °С (див. рис. 4.1).

8. З графіка визначити R_0 , $tg \varphi$ та за формулою (4.4) розрахувати α .

9. Порівняти отримане значення α з довідковим (для міді довідкове $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} 1/\text{рад}$).

10. Обчислити питомий опір міді, використовуючи формулу для опору $R = \rho \frac{l}{S}$, де ρ – питомий опір, l – довжина провідника, S – площа поперечного перетину.

11. По отриманим результатам зробити висновки.

4.3 Контрольні запитання

1. В чому різниця температурної залежності опору металів від напівпровідників?
2. Який параметр обумовлює температурну залежність електропровідності металів?
3. Що називають температурним коефіцієнтом опору?
4. Як впливає власний опір термопари на показання мілівольтметра?
5. З якої причини виміри опору мідного дроту в даній роботі виконуються при відносно малій величині струму?
6. Як впливає опір з'єднувальних провідників на величину ТКО?

Література

1. Епифанов Г.М. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1977.

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

Мета роботи – дослідити залежність опору терморезистора від температури.

5.1 Загальні відомості

Терморезистор – це прилад, опір R якого залежить від температури. Терморезистор виготовляється з напівпровідникової кераміки. Оскільки опір напівпровідників зменшується з ростом T за законом

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E_g}{2kT}\right), \quad (5.1)$$

де ΔE_g – ширина забороненої зони, то і опір терморезистора також різко зменшується при його нагріванні.

Коли по терморезистору пропускають значний струм, то він нагрівається і його опір зменшується. Це приводить до ще більшого зростання струму і відповідно температури. Процес набуває характеру лавини. Тому в мережах, де знаходиться терморезистор, послідовно з ним вмикають додатковий (баластовий) опір. Це захищає електричну мережу від перевантаження. При нагріванні терморезистор перестає бути лінійним опором і закон Ома для нього не виконується (тобто не існує прямо пропорційної залежності між напругою та струмом $U=I \cdot R$). Якщо ж пропускати через терморезистор відносно невеликий струм, то його температура T залишається сталою і сталим буде також опір R . В цьому випадку залежність $I=f(U)$ буде лінійною.

5.2 Порядок виконання роботи

5.2.1 Завдання 1

1. Побудувати вольт-амперну характеристику (ВАХ) терморезистора.
2. Знайти опір терморезистора при різних температурах (T) в діапазоні від кімнатної температури до 120 °С.
3. Побудувати залежність опору R терморезистора від температури.
4. Побудувати залежність $\ln R = f(1/T)$. Знайти енергію активації E_a .
5. По графіку залежності $R = f(T)$, або по таблиці експериментальних даних визначити температурний коефіцієнт опору (ТКО) α для $6 \div 8$

різних температур T в діапазоні $20 \div 120$ °С, та побудувати графік залежності $\alpha = f(T)$.

6 Зробити висновки.

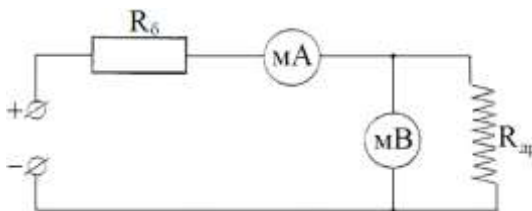
Прилади і обладнання.

1. Джерело постійного струму В-24М (чи інше).
2. Мідний дріт.
3. Вольтметри-амперметри.
4. Термопара.
5. Електрична пічка.
6. Провідники.

Хід виконання.

Терморезистор разом з термопарою ХК (хромель-копель) розташовується у вертикальній електричній пічці, яка вмикається в мережу ~ 220 В.

Опір терморезистора визначають, використовуючи закон Ома для ділянки кола $R = U/I$. Принципова електрична схема лабораторної установки показана на рис. 5.1.



“+ –” – джерело постійного струму; R_b – баластний опір (≈ 2500 Ом); (mA) – міліамперметр для вимірювання струму, що протікає через (mV) і R_d ; (mV) – мілівольтметр, який вимірює падіння напруги на мідному дроті R_d

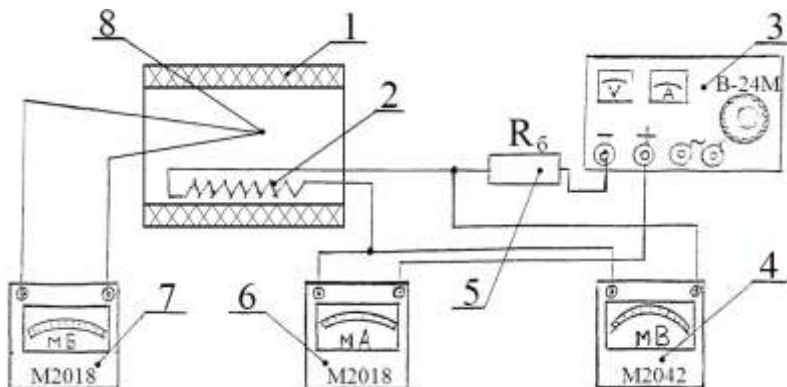
Рисунок 5.1

Електромонтажна схема установки показана на рис. 5.2.

1. Спочатку знімаємо ВАХ терморезистора, при кімнатній температурі. Для цього збільшуємо напругу на терморезисторі від 0 В до $0,6 \div 0,7$ В, повертаючи ручку регулятора напруги на джерелі постійного струму.

2. Побудувати графік залежності струму через терморезистор від прикладеної напруги $I = f(U)$. Якщо буде отримано лінійну залежність, то

це буде означати, що терморезистор таким струмом практично не нагрівається.



1 – електропіч (живлення 220В); 2 – досліджуваний мідний дріт; 3 – джерело постійного струму; 4 – мілівольтметр (шкала 10 μA і вона ж буде мілівольтметром на 63 мВ); 5 – $R_{\text{дод.}}$ – додатковий опір ($\approx 2,5 \text{ кОм}$); 6 – міліамперметр (шкала 7,5 мА, множник – 2, $7,5 \cdot 2 = 15 \text{ мА}$); 7 – мілівольтметр для виміру ЕРС термопарі 8 (шкала 15мВ, опір мілівольтметра 21 Ом. Опір термопарі $\approx 1,5 \text{ Ом}$).

Рисунок 5.2

3. Встановити струм через терморезистор близько $0,6 \div 0,7 \text{ мА}$, ввімкнути нагрівання електропічки і відмічати напругу та струм приблизно через кожні 15°C . Показання всіх приладів заносимо до таблиці 5.1.

4. Коли буде досягнута температура близько $120 \div 130^\circ\text{C}$ (по термопарі це 7 мВ) пічку необхідно вимкнути і записати показання приладів при охолодженні в оберненому порядку.

Увага! Категорично забороняється нагрівати пічку вище 8 мВ. Також забороняється робити будь які перемикання між приладами та перемикачів на самих приладах. Це може привести до виходу приладів з ладу.

5. Після закінчення вимірів, обчислити R , $1/T$ і $\ln R$. Для обчислень опору R треба брати середні значення напруги та сили струму. Для обчислення $1/T$, T необхідно брати по абсолютній шкалі. Її знайти за формулою $T = t_{\text{кім}}^\circ\text{C} + \Delta t^\circ\text{C} + 273 \text{ К}$ ($1^\circ\text{C} = 1 \text{ К}$). Всі результати обчислень занести до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

№ з/п	T, мВ	Δt , °C вища від кімнат.	Напруга на терморезисторі U, В		Сила струму через терморезистор I, А		Опір терморезистора R, Ом	1/T, К ⁻¹	lnR
			при нагрів.	при охолод.	при нагрів.	при охолод.			
1	0								
2	1								
...	...								
7	7								

6. Використовуючи дані таблиці побудувати графіки $R=f(T)$ та $\ln R=f(1/T)$. Якісний вигляд цих графіків показаний на рис. 5.3 та 5.4.

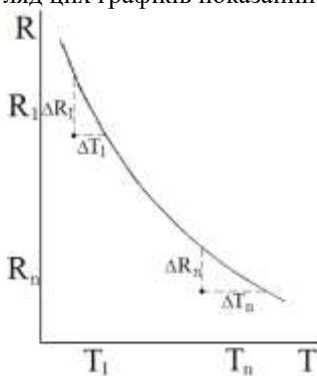


Рисунок 5.3

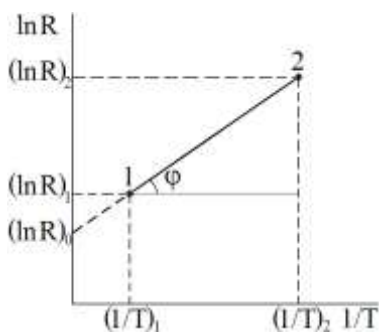


Рисунок 5.4

7. Користуючись графіком (рис. 5.3) знайти температурний коефіцієнт опору (ТКО) терморезистора для температур 20, 40, 60, 80, 100° С.

По визначенню ТКО α : дорівнює:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \approx \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T}. \quad (5.2)$$

Із (5.1), отримаємо для dR/dT такий вираз:

$$\frac{dR}{dT} = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E_g}{2kT}\right) \left(-\frac{\Delta E_g}{2kT^2}\right). \quad (5.3)$$

Враховуючи, що $R_0 \exp\left(\frac{\Delta E_g}{2kT}\right) = R$, маємо:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{\Delta E_g}{2kT^2}. \quad (5.4)$$

8. Побудувати графік залежності $\alpha = f(T)$.

9. Для знаходження енергії активації E_a побудувати графік залежності $\ln R = f(1/T)$ (див. рис. 5.4). Згідно з формулою (5.1):

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta E_a}{2k} \cdot \frac{1}{T}, \quad (5.5)$$

тобто залежність $\ln R = f(1/T)$ є лінійною.

З формули (5.5) та рис. 5.4 легко бачити, що:

$$\frac{\Delta E_a}{2k} = \text{tg} \phi = \frac{(\ln R)_2 - (\ln R)_1}{(1/T)_2 - (1/T)_1}, \quad (5.6)$$

звідси знаходимо E_a . Розрахувати E_a в еВ та порівняти отриманий результат з тим, який можна отримати, поєднуючи (5.4) та (5.2).

10. Зробити висновки по температурній залежності опору та ТКО терморезистора.

5.2.2 Завдання 2

1 Дослідити залежність опору терморезистора від температури.

2 Визначити температурний коефіцієнт опору (ТКО) α для декількох значень температури T .

Прилади і обладнання.

1. Цифровий мультиметр з термопарою – 1 шт.
2. Цифровий мультиметр – 1 шт.
3. Досліджуваний терморезистор ММТ – 1 шт.

4. Дротяна піч – 1 шт.
5. Джерело постійного струму AC-DC з вихідною напругою 6 В – 1 шт.
6. З'єднувальні провідники.

Хід виконання.

1. Зібрати робочу схему згідно з монтажною (рис. 5.5).

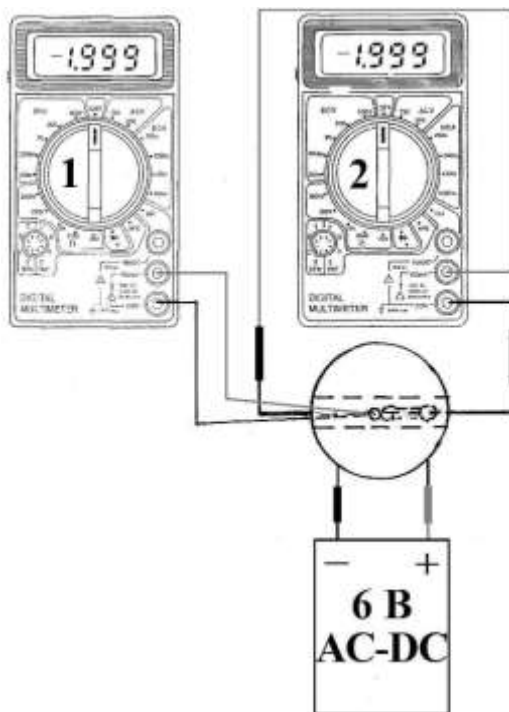


Рисунок 5.5

2. Розташувати у циліндричній порожнині дротяної печі спай термопари та терморезистор.
3. Виставити межі вимірювань на приладах: прилад 1 – «TEMP °C», прилад 2 – «200 Ω ».
4. Ввімкнути джерело постійного струму до мережі.
5. Після розігріву печі при досягненні температури 85 °C вимкнути джерело струму від мережі.
6. Омметром (прилад 2) через кожні 5 °C знімати значення опору R терморезистора, який остигає, та заносити до табл. 5.2:

Таблиця 7.2

№, з/п	$\Delta t, ^\circ \text{C}$	T, K	$1/T, \text{K}^{-1}$	$R, \text{Ом}$	$\ln R$

7. За результатами експерименту побудувати графіки залежностей

$$R = f(T) \text{ та } \ln R = f\left(\frac{1}{T}\right).$$

8. З графіка $R = f(T)$ знайти ТКО α для декількох значень температури T .

9. Зробити висновки.

5.3 Контрольні запитання

1. Що таке терморезистор?
2. Як змінюється опір терморезистора при нагріванні?
3. Як залежить ТКО терморезистора від температури?
4. При яких температурах (високих чи низьких) чутливість терморезистора до зміни температури буде більшою?
5. Як зонна теорія пояснює зміну опору терморезистора з температурою?

Література

1. Епифанов Г.М. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1977.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6

ТЕПЛОВІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

Мета роботи – ознайомитися з тепловими властивостями твердих тіл.

6.1 Загальні відомості

При нагріванні твердого тіла збільшується амплітуда теплових коливань атомів, які знаходяться у вузлах кристалічної ґратки. Коливання будь-якого атома відносно положення рівноваги відбуваються під дією сили зв'язку з сусідніми атомами. Вважають, що ця сила пропорційна зміщенню атома відносно положення рівноваги (пружна сила).

$$F = -\beta x, \quad (6.1)$$

де β – коефіцієнт пружності, x – величина зміщення від положення рівноваги.

Коливання атома будуть гармонічні, а потенціальна енергія взаємодії з сусідніми атомами впововж напрямку ∂x визначається функцією:

$$Y(x) = 1/2 (\beta x^2) + Y_0, \quad (6.2)$$

В цьому випадку відхилення атома від положення рівноваги вправо чи вліво однакові, а середня віддаль між атомами залишається без змін.

Якщо вважати, що теплові коливання атомів будуть гармонічні, тобто відбуваються під дією пружної сили, то при нагріванні лінійні розміри твердих тіл будуть незмінними. Але це суперечить досвіду. Це означає, що сила зв'язку між атомами відрізняється від пружної. Тому в формулу сили зв'язку до лінійного члена необхідно додати квадратичний:

$$F = -\beta x + \gamma x^2, \quad (6.3)$$

де γ – коефіцієнт ангармонічності.

Потенціальна енергія взаємодії атомів в цьому випадку має вигляд:

$$Y(x) = \frac{1}{2} \beta x^2 - \frac{1}{3} \gamma x^3 + Y(0). \quad (6.4)$$

Графік цієї функції вказаний на рис. 6.1.

Відносно вертикальної лінії, що проходить через положення рівноваги ($X=0$), цей графік несиметричний. З підвищенням температури твердого тіла збільшується енергія коливального руху. Якщо атом має енергію $Y(x)$, то він зміщується відносно лінії $X=0$ вправо більше, ніж вліво. Це приводить до того, що середня координата атома \bar{X} не співпадає з положенням $X=0$, а зміщена вправо на величину Δr . При підвищенні темпера-

тури це зміщення збільшується. Відшукаємо формулу для \overline{X} . Середнє значення сили, що діє на атом, повинно бути рівним нулю, тобто:

$$F = -\beta x + \gamma x^2 = 0. \quad (6.5)$$

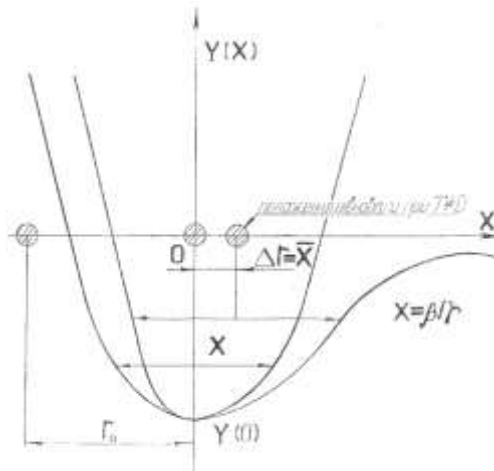


Рисунок 6.1

Для малих амплітуд теплових коливань (а це буде при відносно низьких температурах) можна вважати, що:

$$\frac{1}{2} \beta x^2 \gg \frac{1}{3} \beta x^3. \quad (6.6)$$

В цьому випадку $\overline{X^2}$ можна визначити із співвідношення:

$$\frac{1}{2} \beta \overline{x^2} = \frac{1}{2} kT, \quad (6.7)$$

маючи на увазі, що на одну ступінь свободи випадає середня енергія $\frac{1}{2}(kT)$.

Із формули (6.5) отримаємо:

$$\overline{X} = \frac{\gamma}{\beta} \overline{X^2}. \quad (6.8)$$

Із (6.7) знаходимо, що

$$\overline{X^2} = \frac{kT}{\beta}. \quad (6.9)$$

Підставляючи (8.9) в (8.8) знаходимо \overline{X} :

$$\overline{X} = \frac{\gamma}{\beta^2} kT. \quad (6.10)$$

Таким чином, при температурі T середня віддаль між атомами буде:

$$r(T) = r_0 + \frac{\gamma}{\beta^2} kT. \quad (6.11)$$

При зміні температури на ΔT отримуємо:

$$r(T + \Delta T) = r_0 + \frac{\gamma}{\beta^2} k(T + \Delta T). \quad (6.12)$$

Відносна зміна віддалі між атомами при зміні температури на один градус визначається виразом:

$$\alpha = (r(T + \Delta T) - r(T)) / \Delta T = \gamma k / (\beta^2 r_0). \quad (6.13)$$

Ця величина називається **температурним коефіцієнтом лінійного розширення**. Можна побачити, що вона не залежить від температури. Слід пам'ятати, що при виведенні цього виразу використали умову малих коливань (тобто малих температур).

Для визначення коефіцієнту ангармонічності γ і коефіцієнта β недостатньо знання величини α . Із рис. 6.1 видно, що при $x = \beta / \gamma$ функція потенціальної енергії досягає максимуму. Наближено можна вважати, що в цій точці потенціальна енергія дорівнює нулю. Тобто, температура настільки висока, що сила зв'язку вже не в змозі утримувати атоми разом і відбувається їх випаровування. Якщо $x = \beta / \gamma$, то із (6.4) отримуємо:

$$1/2\beta(\beta/\gamma)^2 - 1/3\gamma(\beta/\gamma)^3 + Y(0) = 0 \Rightarrow Y(0) = -\beta^3 / (6\gamma^2) \quad (6.14)$$

Ця величина потенціальної енергії повинна дорівнювати енергії випаровування, яку можна відшукати в довідковій літературі або по залежності тиску пари цього матеріалу від температури.

Залежність тиску пари деяких металів від температури наведена в табл. 6.1.

Для знаходження енергії випаровування по таблиці необхідно використати формулу (6.15) і в (6.14) замість $Y(0)$ поставити $E_{\text{вип}}$

$$P = P_0 \exp(-E_{\text{вип}} / KT) \quad (6.15)$$

$$E_{\text{вип}} = 1/6(\beta^3 / \gamma^2) \quad (6.16)$$

За допомогою формули (6.16) і (6.13), де необхідно визначити α експериментально, потрібно знайти β і γ . Це дасть можливість побудувати графік функції потенціальної енергії.

Таблиця 6.1

Тиск Елемент	Постій- на грат- ки, Å	10^{-4} мм.рт. ст	10^{-3} мм.рт. ст	10^{-2} мм.рт. ст	10^{-1} мм.рт. ст	10^0 мм.рт. ст
Алюміній	4,05	1245 К	1355 К	1490 К	1640 К	1830 К
Мідь	3,61	1300 К	1405 К	1530 К	1640 К	1890 К
Нікель	3,52	1430 К	1535 К	1655 К	1800 К	1970 К
Титан		1715 К	1850 К	2010 К	2210 К	2450 К
Залізо	2,87	1500 К	1615 К	1750 К	1920 К	2130 К

Для експериментального визначення α використовуються металеві стержні довжиною 120÷150 мм. Їх нагрівають в вертикальний циліндричний печі від кімнатної температури до 200° С. Видовження стержня вимірюється індикатором малих переміщень з точністю 0,01 мм. Температура стержня контролюється термопарою. Необхідно отримати не менше 5 значень, побудувати графік залежності $\Delta l = f(T)$ і визначити α . Розрахувати $E_{\text{вип}}$. За допомогою рівнянь (8.13) та (8.16) знайти β і γ . Побудувати графік функції $Y(x)$.

6.2 Порядок виконання роботи

6.2.1 Завдання 1

- 1 Експериментально визначити коефіцієнт лінійного розширення α .
- 2 Обчислити коефіцієнт ангармонічності γ .
- 3 Побудувати функцію потенціальної енергії $Y(x)$.
- 4 Визначити точність експерименту шляхом порівняння одержаних результатів з довідковими даними, зробити висновок.

Прилади і обладнання.

1. Індикатор малих переміщень.
2. Циліндрична піч.
3. Термопара.
4. Мілівольтметр.
5. Металеві стержні.

Хід виконання.

1. Уважно ознайомитись з теоретичною частиною роботи.
2. Виконати вимірювання теплового розширення. Для цього необхідно:

- а) поставити металевий стержень з відомого металу в пічку;
- б) закріпити індикатор малих переміщень так, щоб його шуп упирався в кінець стержня;
- в) виставити шкалу індикатора на 0;
- г) включити нагрівання і слідкувати за температурою та показаннями індикатора, записувати температуру через кожні 20°C і відповідні показання індикатора; нагрівати до $120\div 130^{\circ}\text{C}$;
- д) побудувати графік залежності видовження стержня від температури $\Delta l = f(T)$; вважаючи що $\Delta l = \alpha \Delta T$, визначити із графіка коефіцієнт лінійного розширення α .

3. Використовуючи формулу (6.15) та дані з таблиці тиску пари при різних температурах знайти енергію випаровування $E_{\text{вип}}$. Це можна зробити аналітично або графічно за допомогою графіка $\ln(p) = f(1/T)$.

4. Користуючись отриманими даними α та $E_{\text{вип}}$ за допомогою формул (6.13) та (6.16) знайти коефіцієнти β та γ . Перевірити і правильно записати їх розмірність.

5. За допомогою формули (8.4) (де $Y(0) = -E_{\text{вип}}$), та отриманих значень β і γ спочатку розрахувати величину потенціальної енергії $Y(x)$ для різних значень X . Для X пропонується такий ряд значень:

$$-3a, -2a, -1a, -0.5a, 0, 0.5a, 1a, 2a, 3a, 4a.$$

де a – стала кристалічної ґратки для даного металу. Цю сталу можна відшукати в приведеній вище таблиці 6.1. Отримавши значення потенціальної енергії для різних X побудувати графік залежності $Y = f(x)$.

6. Для спрощення роботи за п.5 пропонується використати обчислювальну техніку. При цьому необхідно розробити програму обчислень, та побудови графіка.

7. Зробити висновки.

6.2.2 Завдання 2

1 Експериментально визначити питомий вигин A та коефіцієнт чутливості M спіралі біметалевого термометра.

2 Порівняти знайдені значення A і M з довідковими та визначити марку біметала з якого виготовлена спіраль біметалевого термометра.

Прилади і обладнання.

- 1. Цифровий мультиметр з термопарою – 1 шт.
- 2. Біметалевий термометр – 1 шт.
- 3. Чашка Петрі – 1 шт.

Хід виконання.

Дія **біметалевих термометрів** заснована на термометричній властивості теплового розширення різних твердих тіл. У біметалевих термометрах у якості чутливого елемента використовують пластинки або стрічки, що складаються з двох шарів різнорідних металів, які характеризуються різними коефіцієнтами теплового розширення. При зміні температури біметалевої пластинки вона деформується внаслідок неоднакового розширення окремих шарів пластинки (рис. 6.2).

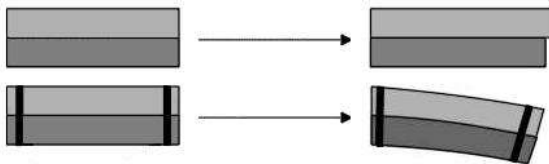


Рисунок 6.2

Якщо закріпити нерухомо один кінець пластинки, то по переміщенню іншого кінця, з'єданого з покажчиком, можна судити про зміну температури. Чутливі елементи біметалічних термометрів зазвичай виконують у формі спіралей, що з'єднуються зі стрілочним покажчиком (рис. 6.3). Прикладом такого біметалевого термометра може служити кімнатний термометр з круглим циферблатом.

Чутливість до зміни температури біметалів характеризується двома параметрами: величиною питомого вигину і коефіцієнтом чутливості.

Питомий вигин A – це вигин вільного кінця пластинки термобіметала довжиною 100 мм і товщиною 1 мм при нагріванні на 1 °C.

Коефіцієнт чутливості M – це умовна різниця коефіцієнтів теплового розширення активного та пасивного шарів термобіметалу.

Залежність між питомим вигином A і коефіцієнтом чутливості M визначається співвідношенням:

$$A = \frac{7500 \cdot M}{C}, \quad (6.17)$$

де $C = 1,15 \div 1,25$ – емпіричний поправочний коефіцієнт.

1. Зібрати робочу схему згідно з монтажною, рис. 6.3.
2. Виставити межу вимірювань на мультиметрі «TEMP °C».
3. Налити у чашку Петрі окуп. Починаючи з температури 80 °C реєструємо кутові переміщення покажчика біметалевого термометра через кожні 5 °C та заносимо до табл. 6.2.

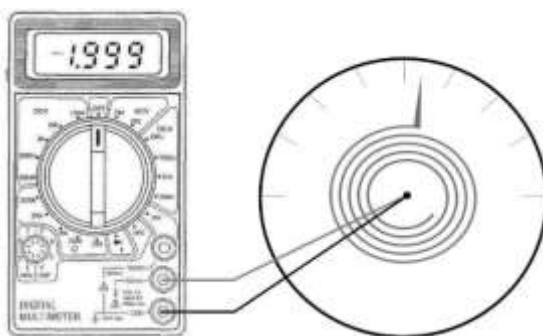


Рисунок 6.3

Таблиця 6.2

№, п/п	$\Delta t, ^\circ \text{C}$	$T, ^\circ \text{C}$	n , поділок	$\varphi, ^\circ$	$A, 1/^\circ \text{C}$	$M, 1/^\circ \text{C}$
1	80					
2	75					
...	...					
12	25					

4. Перевести поділки шкали n у кутові градуси φ положення стрілки біметалевого термометра, вважаючи, що 120 поділок – 360° . Занести розраховані значення φ до табл. 6.2.

5. Побудувати графік залежності кутового положення стрілки біметалевого термометра від температури: $\varphi = f(T)$, де $T = t_k + \Delta t$; t_k – кімнатна температура; Δt – різниця між поточною температурою біметалевої стрічки та кімнатною.

6. Вважаючи, що залежність між φ та T на графіку лінійна, та користуючись формулою:

$$\varphi = \frac{2\pi}{360} \cdot \frac{A \cdot l}{d} \cdot (t_k + \Delta t) = \frac{2\pi}{360} \cdot \frac{A \cdot l}{d} \cdot T, \quad (6.18)$$

де φ – кут на який повертається стрілка термометра при зміні температури на Δt ; $l = 110$ мм та $d = 0,1$ мм – довжина та товщина стрічки спіралі (при кімнатній температурі), відповідно; $\pi = 3,14$; розрахувати питомий вигин A біметалевої спіралі.

7. Знаючи A , із співвідношення (6.17) знайти коефіцієнт чутливості M .

8. Порівняти знайдені значення A та M з довідковими (табл. 6.3) та визначити марку біметала, з якого виготовлена спіраль біметалевого термометра, який використовується у роботі.

9. Написати висновки.

Таблиця 6.3. Фізико-механічні властивості термобіметалу та його складових

Пара-метр	Марка термобіметала						
	ТБ201 3	ТБ161 3	ТБ152 3	ТБ142 3	ТБ132 3	ТБ135 3	ТБ125 4
Марка складових:							
Активний шар	75ГНД	75ГНД	20НГ	24НХ	19НХ	Л62	Л90
Пасивний шар	36Н	45НХ	36Н	36Н	36Н	36Н	36Н
Питомий вигин A , $1/^{\circ}\text{C}$	0,20	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12
Коефіцієнт чутливості M , $\cdot 10^{-6}$, $1/^{\circ}\text{C}$	30-36	23-28	21-25	20-24	18-22,5	19,5-25	19-24

6.3 Контрольні запитання

1. Які вам відомі теплові властивості і явища твердих тіл?
2. Що називають лінійним коефіцієнтом теплового розширення?
3. Що таке гармонічні та ангармонічні коливання?
4. Який вигляд має формула для сили взаємодії між атомами при ангармонічних коливаннях?
5. Які теплові коливання слід вважати малими? Що можна сказати про величину амплітуди таких коливань?
6. Що таке теплоємність та теплопровідність твердого тіла?

Література

1. Епифанов Г.М. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1977.
2. Чистофорова Н.В., Колмогоров А.Г. Технические измерения и приборы. – Ангарск: АГТА, 2008. – 200 с.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1	
Елементи структури кристалічних тіл.....	4
1.1. Загальні відомості.....	4
1.2. Порядок виконання роботи.....	8
1.3. Контрольні запитання.....	8
2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2	
Елементи фізичної статистики.....	10
2.1. Загальні відомості.....	10
2.2. Порядок виконання роботи.....	15
2.2.1. Завдання 1.....	15
2.2.2. Завдання 2.....	17
2.3. Контрольні запитання.....	19
3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3	
Вивчення електропровідності напівпровідників.....	20
3.1. Загальні відомості.....	20
3.2. Порядок виконання роботи.....	23
3.2.1. Завдання 1.....	23
3.2.2. Завдання 2.....	25
3.3. Контрольні запитання.....	27
4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4	
Вивчення електропровідності металів.....	28
4.1. Загальні відомості.....	28
4.2. Порядок виконання роботи.....	29
4.2.1. Завдання 1.....	29
4.2.2. Завдання 2.....	31
4.3. Контрольні запитання.....	33
5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5	
Вивчення електропровідності твердих тіл.....	34
5.1. Загальні відомості.....	34
5.2. Порядок виконання роботи.....	34
5.2.1. Завдання 1.....	34
5.2.2. Завдання 2.....	38
5.3. Контрольні запитання.....	40
6. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6	
Теплові властивості твердих тіл.....	41
6.1. Загальні відомості.....	41
6.2. Порядок виконання роботи.....	44
6.2.1. Завдання 1.....	44
6.2.2. Завдання 2.....	45
6.3. Контрольні запитання.....	48

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
«Фізика твердого тіла»
для студентів спеціальності
153 «Мікро- та наносистемна техніка»
Частина 1

Укладачі: ЗАЙЦЕВ Роман Валентинович
КІРІЧЕНКО Михайло Валерійович
МІНАКОВА Ксенія Олександрівна
ДРОЗДОВ Антон Миколайович

Відповідальний за випуск Р.В. Зайцев

План 2019 р.

Підписано до друку . Формат 60×84 1/16. Папір друк. №2.
Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,2.
Обл.-вид. 3,8. Тираж 50 прим.

Видавничий центр НТУ «ХП». 61002, Харків, вул. Кирипичева, 2.
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Надруковано у типографії ТОВ «Цифра Принт»
на цифровому комплексі Xerox DocuTech 6135.
Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 3.08.2009 г.